

STUDI LITERATUR TENTANG METODE PENDINGINAN ASPAL JALAN DI INDONESIA: TINJAUAN, PENERAPAN, DAN IMPLIKASINYA

S Ch N Palenewen^{1*}, Jason Jimmy Amadeus Palenewen²

¹Program Studi Teknik Sipil FT Universitas Sam Ratulangi

²Program Studi Teknik Bioproses FT Universitas Indonesia

^{1*}spalenewen@unsrat.ac.id

Abstrak: Suhu permukaan jalan di Indonesia umumnya berkisar antara 30-40°C, yang mempercepat kerusakan aspal akibat konduktivitas termal rendah dan penyerapan radiasi matahari yang tinggi. Stres termal ini mengakibatkan rutting dan retakan prematur, mengancam durabilitas dan keselamatan jalan. Untuk mengatasi masalah ini, studi ini menggunakan metodologi tinjauan pustaka komprehensif untuk menjelajahi strategi efektif dalam menurunkan suhu aspal.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa lapisan reflektif dan aspal berwarna terang secara signifikan menurunkan suhu permukaan, meningkatkan daya tahan jalan dan mengurangi biaya pemeliharaan. Selain itu, PCM dan vegetasi strategis mengurangi stres termal, yang lebih meningkatkan kinerja jalan di iklim tropis. Teknologi yang baru berkembang, termasuk perangkat penghasil energi dan teknik pendinginan canggih, menunjukkan potensi dalam meningkatkan ketahanan infrastruktur jalan.

Sebagai kesimpulan, penerapan teknologi ini tidak hanya memperpanjang umur layanan jalan tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi efek pulau panas perkotaan. Dengan menurunkan suhu permukaan jalan, strategi ini meningkatkan keselamatan jalan, kenyamanan, dan kualitas hidup perkotaan secara keseluruhan di Indonesia dan daerah tropis serupa.

Kata kunci: Aspal dingin, Teknologi pendinginan, Urban heat island, Suhu permukaan jalan, Daya tahan jalan aspal

Abstract: Road surface temperatures in Indonesia typically range from 30-40°C, accelerating asphalt deterioration due to low thermal conductivity and high solar radiation absorption. This thermal stress results in premature rutting and cracking, compromising road durability and safety. To address this issue, this study employs a comprehensive literature review methodology to explore effective asphalt temperature reduction strategies.

Research findings indicate that reflective coatings and light-colored asphalt significantly reduce surface temperatures, enhancing pavement durability and reducing maintenance costs. Additionally, PCMs and strategic vegetation mitigate thermal stresses, further improving road performance in tropical climates. Emerging technologies, including energy harvesting devices and advanced cooling techniques, show promise in enhancing road infrastructure resilience.

In conclusion, implementing these technologies not only extends pavement lifespan but also contributes to environmental sustainability by mitigating urban heat island effects. By reducing road surface temperatures, these strategies enhance road safety, comfort, and overall urban liveability in Indonesia and similar tropical regions.

Keywords: Road surface temperature, Cold asphalt, Urban heat island, Asphalt durability, Cooling technology

I. PENDAHULUAN

Rata-rata suhu jalanan di Indonesia adalah 30-40°C. Hal ini mempercepat deteriorasi aspal karena konduktivitas termal material-material aspal jalan rendah dan aspal sendiri menyerap jumlah iradiasi yang tinggi [1]. Sedikit peningkatan suhu di daerah bersuhu tinggi akan

menyebabkan penurunan tajam kinerja aspal. Di bawah beban berulang kendaraan, ketika tegangan geser lebih besar dari kekuatan geser, deformasi plastis pada campuran aspal akan terjadi, yang menyebabkan masalah rutting pada suhu tinggi [2]. Fenomena ini tidak hanya mempengaruhi umur jalan, tetapi juga berdampak pada keselamatan dan kenyamanan pengendara.

Selain itu, fenomena Urban Heat Island (UHI) akibat suhu tinggi di kawasan perkotaan menyebabkan peningkatan konsumsi energi, polusi udara, polusi air, dan menurunkan kenyamanan termal manusia. UHI adalah area metropolitan yang secara signifikan lebih hangat daripada daerah pedesaan di sekitarnya akibat aktivitas manusia. Fenomena ini disebabkan oleh modifikasi permukaan lahan dan panas limbah yang dihasilkan oleh penggunaan energi. Bangunan, jalan, dan infrastruktur lainnya menyerap dan memancarkan kembali panas matahari lebih dari lanskap alami seperti hutan dan badan air. Efek ini menyebabkan suhu yang lebih tinggi di daerah perkotaan, terutama pada malam hari. Efek UHI memperburuk gelombang panas, meningkatkan konsumsi energi, menaikkan emisi polutan udara dan gas rumah kaca, serta berdampak pada kesehatan dan kenyamanan manusia [3].

Kondisi ini memicu penelitian dan pengembangan berbagai teknologi dan metode untuk mengurangi suhu permukaan jalan. Berbagai institusi teknik dan pemerintah mendefinisikan "cool pavement" sebagai permukaan jalan yang didesain untuk mengurangi penyerapan panas dan meningkatkan pemantulan radiasi matahari [2].

Upaya saat ini untuk mengurangi suhu permukaan jalan mencakup beberapa metode. Coating reflektif dan penggunaan aspal berwarna terang telah terbukti efektif dalam mengurangi penyerapan panas [1]. Material dengan konduktivitas termal rendah, penanaman strategis, dan penggunaan bahan perubahan fase (Phase Change Materials) juga mulai diterapkan [3]. Teknologi lain seperti perangkat pemanen energi, pendinginan evaporatif, teknologi difusivitas termal, dan teknologi induksi termal terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan infrastruktur jalan [2]. Implementasi metode-metode ini diharapkan dapat mengurangi dampak negatif dari suhu tinggi pada jalan dan lingkungan sekitarnya.

II. METODOLOGI

Studi ini menggunakan metodologi tinjauan literatur untuk meneliti berbagai metode pengurangan suhu aspal guna meningkatkan daya tahan dan umur jalan raya di Indonesia. Tinjauan literatur adalah pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian serta publikasi yang ada pada topik tertentu. Metode ini sangat cocok untuk penelitian ini karena memungkinkan agregasi dan analisis kritis dari temuan yang beragam dari berbagai sumber, memberikan pemahaman yang luas tentang keadaan pengetahuan saat ini dan mengidentifikasi kesenjangan yang perlu diteliti lebih lanjut [4]; [5].

Proses dimulai dengan identifikasi basis data akademik dan jurnal yang relevan yang menerbitkan penelitian tentang teknologi perkerasan aspal, sifat termal material jalan, dan efek pulau panas perkotaan. Basis data utama termasuk Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink, di antara lainnya. Kata kunci seperti "pengurangan suhu aspal," "teknologi perkerasan dingin," "pulau panas perkotaan," dan "ketahanan perkerasan aspal" digunakan untuk menemukan studi yang relevan. Kriteria inklusi adalah artikel jurnal yang ditinjau oleh sejawat, makalah konferensi, dan laporan teknis yang diterbitkan dalam dua dekade terakhir untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi [2].

Studi yang dipilih kemudian dikategorikan berdasarkan metode yang mereka eksplorasi untuk mengurangi suhu aspal. Kategori ini mencakup pelapis reflektif, aspal berwarna

terang, bahan perubahan fase (PCM), perangkat pemanen energi, dan teknologi pendinginan canggih. Setiap metode ditinjau untuk menilai efektivitasnya, tantangan implementasi praktis, dan dampak potensial pada ketahanan dan keberlanjutan perkerasan aspal. Perhatian khusus diberikan pada studi yang dilakukan di iklim yang mirip dengan Indonesia untuk memastikan praktikalitas penerapan [1]; [3]

Untuk mensintesis informasi, analisis tematik dilakukan. Ini melibatkan ekstraksi temuan utama, metodologi, dan hasil dari setiap studi dan mengorganisasikannya ke dalam tema dan sub-tema yang koheren. Tema-tema tersebut berfokus pada mekanisme di mana setiap metode mengurangi suhu aspal, material dan teknologi yang digunakan, dan hasil yang dilaporkan dalam hal kinerja dan durasi umur perkerasan. Dengan membandingkan dan mengkontraskan temuan ini, tinjauan ini bertujuan untuk mengidentifikasi metode yang paling menjanjikan untuk diterapkan dalam konteks iklim dan infrastruktur unik Indonesia [1]; [2].

Pendekatan tinjauan literatur ini memberikan kerangka kerja yang kuat untuk memahami efektivitas berbagai metode pengurangan suhu aspal dan potensinya untuk meningkatkan daya tahan jalan di Indonesia. Ini juga menyoroti area di mana penelitian lebih lanjut diperlukan, membimbing studi dan implementasi praktis di masa depan. Wawasan yang diperoleh dari tinjauan ini akan menginformasikan pembuat kebijakan, insinyur, dan peneliti yang bekerja untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan perkerasan aspal di iklim panas [3]; Mahani et al., 2021).

III. TINJAUAN LITERATUR

1. Penggunaan Coating Reflektif

Coating reflektif adalah salah satu teknologi yang digunakan untuk mengurangi suhu permukaan aspal. Coating ini dirancang untuk memantulkan kembali sebagian besar radiasi matahari yang diterima, sehingga mengurangi penyerapan panas oleh permukaan jalan. [1] menunjukkan bahwa penggunaan coating reflektif dapat mengurangi suhu permukaan hingga 10°C.

Coating reflektif bekerja dengan meningkatkan albedo permukaan jalan, yang mengurangi jumlah panas yang diserap dan meningkatkan jumlah panas yang dipantulkan kembali ke atmosfer. Beberapa jenis bahan yang umum digunakan untuk coating reflektif termasuk akrilik, silika, dan polimer tertentu yang memiliki sifat reflektif tinggi. Penelitian oleh [6] menemukan bahwa permukaan jalan yang dilapisi dengan bahan reflektif dapat mengurangi suhu permukaan secara signifikan, terutama pada hari-hari yang sangat panas. Dalam eksperimen mereka, permukaan jalan yang dilapisi coating reflektif menunjukkan penurunan suhu antara 7°C hingga 10°C dibandingkan dengan permukaan jalan konvensional.

Implementasi coating reflektif pada permukaan jalan yang ada relatif mudah dan tidak memerlukan perubahan besar pada struktur jalan. Metode aplikasi termasuk penggunaan alat penyemprot yang dapat menerapkan lapisan tipis bahan reflektif secara merata di seluruh permukaan jalan. Hal ini membuat coating reflektif menjadi solusi praktis dan cepat untuk diterapkan di berbagai jenis jalan, baik di perkotaan maupun di daerah pedesaan. Misalnya, di kota Phoenix, penggunaan coating reflektif berhasil mengurangi suhu permukaan jalan hingga 10°C, meningkatkan kenyamanan termal dan mengurangi biaya perawatan jalan [7].

Selain manfaat langsung dalam pengurangan suhu permukaan, penggunaan coating reflektif juga dapat meningkatkan umur jalan dengan mengurangi ekspansi termal dan keretakan yang disebabkan oleh suhu tinggi. Studi oleh [2] menunjukkan bahwa jalan yang dilapisi dengan coating reflektif memiliki umur yang lebih panjang dibandingkan dengan jalan yang tidak dilapisi, karena pengurangan stres termal pada material aspal. Lebih lanjut, penelitian ini juga menemukan bahwa biaya implementasi coating reflektif dapat diimbangi dengan

pengurangan biaya perawatan jangka panjang, membuatnya menjadi investasi yang berharga bagi pemerintah dan pengelola jalan.

2. Aspal Berwarna Terang

Penggunaan aspal berwarna terang juga menjadi metode yang efektif dalam mengurangi suhu permukaan jalan. Aspal berwarna terang memiliki albedo yang lebih tinggi dibandingkan dengan aspal konvensional, sehingga mampu memantulkan lebih banyak radiasi matahari. Penelitian oleh [3] menunjukkan bahwa aspal berwarna terang dapat mengurangi suhu permukaan hingga 15°C dibandingkan dengan aspal konvensional.

Aspal berwarna terang bekerja dengan cara meningkatkan reflektivitas permukaan jalan, yang mengurangi penyerapan panas dan menurunkan suhu permukaan. Material yang digunakan untuk membuat aspal berwarna terang termasuk pigmen seperti titanium dioksida dan oksida besi, yang memiliki sifat reflektif tinggi. Studi oleh Badan Geologi (2022) mengindikasikan bahwa sumber daya mineral seperti kalsium karbonat, yang juga dapat digunakan sebagai pigmen, tersedia secara melimpah di Indonesia, sehingga mendukung implementasi metode ini secara luas.

Keberhasilan penggunaan aspal berwarna terang telah dilaporkan di beberapa negara. Di Amerika Serikat, kota Los Angeles menerapkan program 'Cool Pavement' yang menggunakan aspal berwarna terang di jalan-jalan tertentu. Hasilnya menunjukkan penurunan suhu permukaan jalan yang signifikan, mengurangi suhu lingkungan sekitar dan meningkatkan kenyamanan termal [8]. Penelitian lebih lanjut oleh [9] di Tokyo juga menunjukkan hasil serupa, dengan penurunan suhu permukaan yang membantu mengurangi efek UHI.

Implementasi aspal berwarna terang di Indonesia memerlukan beberapa penyesuaian pada proses produksi aspal. Produsen aspal perlu menambahkan pigmen reflektif ke dalam campuran aspal selama proses produksi. Hal ini mungkin memerlukan modifikasi pada pabrik aspal, seperti pemasangan alat pencampur pigmen. Namun, biaya tambahan ini diimbangi dengan pengurangan biaya perawatan jalan jangka panjang dan peningkatan umur jalan. Penelitian oleh [3] menunjukkan bahwa investasi awal dalam aspal berwarna terang dapat memberikan pengembalian investasi yang signifikan dalam bentuk pengurangan biaya perawatan dan peningkatan umur jalan.

3. Material dengan Konduktivitas Termal Rendah

Material dengan konduktivitas termal rendah dapat mengurangi transfer panas dari permukaan jalan ke dalam lapisan bawah. Penggunaan material ini dapat membantu menjaga suhu permukaan jalan tetap rendah meskipun terpapar suhu tinggi. Studi oleh [1] mengindikasikan bahwa penggunaan material dengan konduktivitas termal rendah dapat mengurangi suhu permukaan hingga 8°C .

Material seperti batu kapur, lempung, dan bahan komposit lainnya telah diuji untuk digunakan dalam campuran aspal. Penelitian oleh [5] menunjukkan bahwa campuran aspal yang menggunakan bahan-bahan ini dapat secara efektif menurunkan suhu permukaan dan meningkatkan kinerja termal jalan. Penggunaan material dengan konduktivitas termal rendah juga dapat membantu mengurangi frekuensi dan keparahan retakan termal, yang merupakan masalah umum di daerah dengan suhu tinggi.

Implementasi material dengan konduktivitas termal rendah memerlukan penyesuaian pada formula campuran aspal dan proses produksi. Penelitian oleh [4] menemukan bahwa penggunaan aditif seperti serat polimer dapat meningkatkan kinerja termal dan mekanis campuran aspal, membuatnya lebih tahan terhadap suhu tinggi dan beban lalu lintas berat. Studi ini menunjukkan bahwa modifikasi kecil pada formula campuran aspal dapat

memberikan manfaat yang signifikan dalam hal pengurangan suhu permukaan dan peningkatan umur jalan.

Penelitian oleh [5] menunjukkan bahwa penggunaan material dengan konduktivitas termal rendah seperti *ceramic waste aggregate* (CA) juga dapat berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dengan menurunkan suhu dari aspal jalan. Selain itu, penelitian di [5] menemukan bahwa, jika penggunaan biasa menggunakan batu kapur, substitusi dengan kuarsit menaikkan inersia termal yang berdampak pada pelambatan laju pemanasan atau pendinginan dibandingkan dengan material yang memiliki inersia termal lebih rendah.

Dengan mengurangi suhu permukaan jalan, material ini dapat membantu menurunkan efek UHI dan mengurangi konsumsi energi yang diperlukan untuk pendinginan lingkungan sekitar. menunjukkan bahwa implementasi material ini di proyek-proyek jalan raya dapat memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi jangka panjang, membuatnya menjadi pilihan yang menarik untuk pengembangan infrastruktur jalan di Indonesia.

4. Penanaman Strategis

Penanaman pohon atau vegetasi di sekitar jalan dapat memberikan efek pendinginan melalui proses evapotranspirasi. Vegetasi juga dapat menyediakan naungan, yang mengurangi penyerapan panas oleh permukaan jalan. [3] menyatakan bahwa penanaman strategis dapat mengurangi suhu permukaan jalan hingga 5°C.

Penelitian oleh [10] menunjukkan bahwa pohon yang ditanam di sepanjang jalan dapat mengurangi suhu permukaan jalan dan lingkungan sekitarnya secara signifikan. Pohon-pohon ini bertindak sebagai penghalang fisik yang mengurangi jumlah radiasi matahari yang mencapai permukaan jalan. Selain itu, proses evapotranspirasi dari daun pohon membantu menurunkan suhu udara di sekitar jalan, menciptakan lingkungan yang lebih sejuk.

Implementasi penanaman strategis memerlukan perencanaan yang cermat untuk memastikan bahwa jenis pohon yang dipilih sesuai dengan kondisi iklim dan tanah setempat. Penelitian oleh [17] menunjukkan bahwa spesies pohon tertentu memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengurangi suhu permukaan melalui naungan dan evapotranspirasi. Misalnya, pohon dengan kanopi lebar dan daun lebat cenderung memberikan efek pendinginan yang lebih besar dibandingkan dengan pohon yang memiliki kanopi kecil atau daun jarang.

Manfaat tambahan dari penanaman pohon di sepanjang jalan termasuk peningkatan estetika lingkungan, pengurangan polusi udara, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat sekitar. Studi oleh [2] menunjukkan bahwa penanaman pohon di perkotaan dapat mengurangi suhu permukaan jalan, meningkatkan kenyamanan termal, dan mengurangi konsumsi energi untuk pendinginan. Selain itu, pohon-pohon ini juga dapat membantu mengurangi limpasan air hujan, mengurangi risiko banjir, dan meningkatkan kualitas air.

5. Bahan Perubahan Fase (Phase Change Materials - PCM)

PCM adalah bahan yang dapat menyimpan dan melepaskan energi dalam bentuk panas saat mereka mengalami perubahan fase (misalnya dari padat ke cair). Penggunaan PCM dalam lapisan aspal dapat membantu menyerap panas selama periode puncak suhu, kemudian melepaskannya saat suhu turun. Penelitian oleh [3] menunjukkan bahwa PCM dapat mengurangi suhu permukaan hingga 7°C.

Penelitian oleh [12] menunjukkan bahwa penggunaan PCM dalam campuran aspal dapat membantu mengurangi suhu permukaan jalan selama periode panas yang ekstrem. PCM bekerja dengan cara menyerap panas saat suhu meningkat, yang mencegah suhu permukaan jalan naik terlalu tinggi. Ketika suhu turun, PCM melepaskan panas yang tersimpan, membantu menjaga suhu permukaan jalan tetap stabil. Studi ini menemukan bahwa

penggunaan PCM dalam campuran aspal dapat mengurangi suhu permukaan jalan hingga 5-7°C.

Implementasi PCM dalam campuran aspal memerlukan penyesuaian pada formula campuran dan proses produksi. Penelitian oleh [13] menunjukkan bahwa penambahan PCM ke dalam campuran aspal dapat mempengaruhi sifat mekanis campuran, seperti kekuatan dan daya tahan. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa penggunaan PCM tidak mengurangi kinerja struktural jalan. Studi ini menunjukkan bahwa dengan formula yang tepat, penggunaan PCM dapat meningkatkan kinerja termal dan umur jalan tanpa mengorbankan kekuatan mekanisnya.

Keuntungan tambahan dari penggunaan PCM termasuk peningkatan kenyamanan termal di sekitar jalan dan pengurangan biaya perawatan jalan. Studi oleh [2] menunjukkan bahwa jalan yang menggunakan PCM memerlukan perawatan yang lebih sedikit karena pengurangan stres termal pada material aspal. Selain itu, penggunaan PCM juga dapat membantu mengurangi efek UHI, membuat lingkungan perkotaan lebih nyaman dan berkelanjutan.

6. Teknologi Pemanen Energi

Perangkat pemanen energi seperti panel surya yang dipasang di atas permukaan jalan dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik, yang selain menghasilkan energi, juga mengurangi panas yang diserap oleh permukaan jalan. [2] melaporkan bahwa teknologi ini dapat mengurangi suhu permukaan hingga 12°C.

Penelitian oleh [14] menunjukkan bahwa penggunaan panel surya di jalan raya dapat membantu mengurangi suhu permukaan dan menghasilkan energi yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan, seperti penerangan jalan dan pengisian kendaraan listrik. Studi ini menemukan bahwa jalan yang dilengkapi dengan panel surya menunjukkan penurunan suhu permukaan antara 8-12°C dibandingkan dengan jalan konvensional. Selain itu, energi yang dihasilkan dari panel surya dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, membantu mengurangi emisi karbon dan meningkatkan keberlanjutan lingkungan.

Implementasi teknologi pemanen energi memerlukan investasi awal yang cukup besar untuk pemasangan panel surya dan infrastruktur pendukungnya. Namun, penelitian oleh [15] menunjukkan bahwa biaya awal ini dapat diimbangi dengan penghematan energi dan pengurangan biaya perawatan jalan dalam jangka panjang. Studi ini menemukan bahwa jalan yang dilengkapi dengan panel surya memerlukan perawatan yang lebih sedikit karena pengurangan suhu permukaan yang signifikan, yang membantu mencegah kerusakan termal pada material aspal.

Keuntungan tambahan dari penggunaan teknologi pemanen energi termasuk peningkatan keamanan jalan dan peningkatan kualitas udara. Studi oleh [2] menunjukkan bahwa jalan yang dilengkapi dengan panel surya dapat dilengkapi dengan sistem penerangan yang lebih baik, yang meningkatkan visibilitas dan keamanan bagi pengguna jalan. Selain itu, pengurangan suhu permukaan jalan juga dapat membantu mengurangi pembentukan ozon troposferik, yang merupakan polutan udara yang berbahaya bagi kesehatan manusia.

7. Pendinginan Evaporatif

Teknologi pendinginan evaporatif melibatkan penggunaan air untuk mendinginkan permukaan jalan. Air yang disemprotkan ke permukaan jalan akan menguap, mengambil panas dari permukaan jalan dan dengan demikian mengurangi suhunya. [2] menyatakan bahwa pendinginan evaporatif dapat mengurangi suhu permukaan hingga 10°C.

Penelitian oleh [16] menunjukkan bahwa sistem pendinginan evaporatif dapat secara efektif menurunkan suhu permukaan jalan selama periode panas yang ekstrem. Studi ini menemukan bahwa dengan penyemprotan air secara berkala, suhu permukaan jalan dapat dikurangi antara 8-10°C, tergantung pada kondisi lingkungan dan intensitas penyemprotan. Teknologi ini telah diterapkan di beberapa kota besar untuk mengatasi efek UHI dan meningkatkan kenyamanan termal di area perkotaan.

Implementasi teknologi pendinginan evaporatif memerlukan infrastruktur untuk penyimpanan dan distribusi air, serta sistem kontrol untuk mengatur waktu dan intensitas penyemprotan. Penggunaan teknologi ini memerlukan perencanaan yang matang untuk memastikan efisiensi dan keberlanjutan. Studi ini menemukan bahwa dengan sistem yang terintegrasi dengan baik, teknologi pendinginan evaporatif dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam hal pengurangan suhu permukaan dan peningkatan kenyamanan termal.

Keuntungan tambahan dari teknologi pendinginan evaporatif termasuk peningkatan kualitas udara dan pengurangan risiko kebakaran. Studi oleh [2] menunjukkan bahwa dengan menurunkan suhu permukaan jalan, teknologi ini dapat membantu mengurangi pembentukan ozon troposferik dan partikel polutan lainnya. Selain itu, dengan menjaga permukaan jalan tetap lembab, teknologi ini dapat membantu mengurangi risiko kebakaran di area yang rentan terhadap kekeringan dan suhu tinggi.

8. Teknologi Difusivitas Termal dan Induksi Termal

Teknologi difusivitas termal melibatkan penggunaan material yang dapat dengan cepat menyebarkan panas, mengurangi konsentrasi panas pada titik tertentu. Sementara itu, teknologi induksi termal melibatkan penggunaan medan magnet untuk memanipulasi aliran panas dalam material. Kedua teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam mengurangi suhu permukaan jalan [1].

Penelitian oleh [18] menunjukkan bahwa penggunaan material dengan difusivitas termal tinggi dapat membantu mengurangi suhu permukaan jalan dengan menyebarkan panas secara merata. Studi ini menemukan bahwa material seperti grafit dan karbon memiliki kemampuan difusivitas termal yang tinggi, yang dapat meningkatkan kinerja termal campuran aspal. Penggunaan material ini dapat mengurangi suhu permukaan jalan antara 6-8°C, tergantung pada komposisi campuran dan kondisi lingkungan.

Teknologi induksi termal melibatkan penggunaan medan magnet untuk mengontrol aliran panas dalam material jalan. Penelitian oleh [19] menunjukkan bahwa dengan menggunakan induksi termal, suhu permukaan jalan dapat dikendalikan lebih efektif, mencegah titik panas yang dapat menyebabkan kerusakan termal. Studi ini menemukan bahwa teknologi induksi termal dapat mengurangi suhu permukaan jalan hingga 7°C, meningkatkan umur dan kinerja jalan.

Implementasi kedua teknologi ini memerlukan penyesuaian pada proses produksi dan pemasangan jalan. Penelitian oleh [2] menunjukkan bahwa biaya awal untuk teknologi ini dapat diimbangi dengan pengurangan biaya perawatan jangka panjang dan peningkatan umur jalan. Selain itu, kedua teknologi ini juga dapat membantu mengurangi efek UHI, meningkatkan kenyamanan termal, dan mengurangi konsumsi energi untuk pendinginan lingkungan sekitar.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel I. Rangkuman dampak penurunan suhu metode-metode penurunan suhu permukaan aspal

Metode Pengurangan Suhu	Penurunan Suhu	Referensi
-------------------------	----------------	-----------

Permukaan Aspal (°C)		
Coating Reflektif	10-20	[6]
Aspal Berwarna Terang	15	[3]
Material dengan Konduktivitas Termal Rendah	8	[19]
Penanaman Strategis	5	[17]
Bahan Perubahan Fase (PCM)	7	[20]
Teknologi Pemanen Energi	19	[14]
Pendinginan Evaporatif	8-10	[16]
Teknologi Difusivitas Termal dan Induksi Termal	5-10	[20]

Metode pengurangan suhu permukaan aspal untuk memperpanjang umur dan meningkatkan kinerja jalan telah menjadi fokus penelitian global. Salah satu pendekatan utama adalah penggunaan *cool pavement*, yaitu permukaan jalan yang didesain untuk mengurangi penyerapan panas dan meningkatkan pemantulan radiasi matahari [2]. *Cool pavement* telah menunjukkan potensi dalam mengurangi suhu permukaan, yang berdampak langsung pada penurunan suhu lingkungan sekitar dan peningkatan kenyamanan termal [3].

Aspal berwarna terang dan coating reflektif muncul sebagai metode paling menjanjikan untuk diterapkan di Indonesia berdasarkan efektivitas pengurangan suhu permukaan dan kesesuaian dengan kondisi lokal. Aspal berwarna terang dapat mengurangi suhu permukaan hingga 15°C [3], menjadikannya metode paling efektif dalam penelitian ini. Implementasi aspal berwarna terang cocok dengan kondisi Indonesia karena ketersediaan bahan pewarna dan pigmen reflektif yang dapat diintegrasikan dengan mudah ke dalam proses produksi aspal yang ada. Bahan-bahan ini, seperti titanium dioksida dan oksida besi, dapat diperoleh dari pemasok lokal atau diimpor dengan biaya yang relatif terjangkau. Indonesia memiliki sumber daya mineral yang cukup, terutama kalsium karbonat yang dapat diekstraksi dari batu kapur di berbagai daerah seperti Jawa Barat dan Sumatera (Badan Geologi, 2022).

Keberhasilan penggunaan aspal berwarna terang telah dilaporkan di beberapa negara. Di Amerika Serikat, kota Los Angeles menerapkan program 'Cool Pavement' yang menggunakan aspal berwarna terang di jalan-jalan tertentu. Hasilnya menunjukkan penurunan suhu permukaan jalan yang signifikan, mengurangi suhu lingkungan sekitar dan meningkatkan kenyamanan termal [8]. Di Jepang, teknologi serupa juga telah diterapkan di Tokyo, menghasilkan penurunan suhu permukaan yang signifikan dan membantu mengurangi efek UHI [9].



Gambar 1. Penerapan coating reflektif di Los Angeles
(Sumber: goodgoodgood.co)

Coating reflektif juga menunjukkan hasil yang signifikan dengan penurunan suhu permukaan hingga 20°C [6]. Coating reflektif dapat dengan mudah diaplikasikan pada permukaan jalan yang sudah ada, membuatnya menjadi solusi praktis dan cepat untuk mengurangi suhu jalan. Bahan-bahan yang digunakan dalam coating reflektif, seperti akrilik dan silika, tersedia secara luas dan dapat diperoleh dari pemasok bahan kimia lokal. Pengalaman dari kota Phoenix di Amerika Serikat menunjukkan bahwa penggunaan coating reflektif berhasil mengurangi suhu permukaan jalan dan meningkatkan umur jalan [7].

Implementasi kedua metode ini memerlukan beberapa penyesuaian pada proses pembangunan jalan yang saat ini digunakan di Indonesia. Untuk aspal berwarna terang, produsen aspal perlu menambahkan pigmen reflektif ke dalam campuran aspal selama proses produksi. Hal ini mungkin memerlukan modifikasi pada pabrik aspal, seperti pemasangan alat pencampur pigmen. Namun, biaya tambahan ini diimbangi dengan pengurangan biaya perawatan jalan jangka panjang dan peningkatan umur jalan. Untuk coating reflektif, aplikasi dapat dilakukan sebagai lapisan tambahan setelah jalan selesai dibangun, menggunakan peralatan semprot yang sudah umum digunakan dalam industri konstruksi jalan.

Di samping manfaat langsung pada pengurangan suhu permukaan, metode ini juga memberikan keuntungan tambahan seperti pengurangan biaya energi dan peningkatan kesehatan masyarakat akibat penurunan suhu lingkungan sekitar. Penelitian lebih lanjut dan uji coba lapangan di berbagai kondisi cuaca dan lokasi di Indonesia akan memberikan wawasan tambahan untuk optimalisasi implementasi metode-metode ini. Studi-studi ini akan membantu memastikan bahwa solusi yang diadopsi sesuai dengan kebutuhan spesifik dan tantangan yang dihadapi oleh infrastruktur jalan di Indonesia.

V. KESIMPULAN

Dalam upaya meningkatkan daya tahan dan umur jalan di Indonesia, metode pengurangan suhu permukaan aspal seperti penggunaan aspal berwarna terang dan coating reflektif telah terbukti efektif. Penurunan suhu permukaan hingga 15°C dengan aspal berwarna terang [3] dan hingga 20°C dengan coating reflektif [6] menunjukkan potensi signifikan untuk mengurangi kerusakan jalan yang diakibatkan oleh suhu tinggi. Selain itu, metode ini juga dapat membantu mengurangi efek UHI, yang merupakan masalah serius di daerah perkotaan.

Keberhasilan penerapan teknologi ini di negara-negara lain, seperti Amerika Serikat dan Jepang, memberikan bukti tambahan tentang efektivitas dan keuntungan dari metode ini. Di Los Angeles, program 'Cool Pavement' menunjukkan hasil yang positif dengan pengurangan suhu permukaan yang signifikan [8], sementara di Tokyo, implementasi teknologi serupa membantu mengurangi efek UHI secara keseluruhan [9].

Metode pengurangan suhu ini tidak hanya menawarkan keuntungan teknis dan lingkungan, tetapi juga manfaat ekonomi. Penurunan suhu permukaan yang signifikan dapat mengurangi biaya perawatan jalan dan memperpanjang umur jalan, yang pada akhirnya menghemat anggaran pemerintah dalam jangka panjang. Selain itu, dengan meningkatkan kenyamanan termal dan mengurangi suhu lingkungan, kesehatan dan kesejahteraan masyarakat juga akan meningkat.

Untuk memaksimalkan manfaat dari metode pengurangan suhu permukaan aspal, diperlukan langkah-langkah kolaboratif dari berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, universitas, dan sektor swasta.

Pemerintah perlu mengadopsi kebijakan yang mendorong penggunaan teknologi pengurangan suhu permukaan aspal. Ini bisa berupa insentif pajak untuk perusahaan yang mengimplementasikan teknologi ini, atau penerapan standar baru dalam pembangunan dan pemeliharaan jalan yang mengharuskan penggunaan aspal berwarna terang atau coating

reflektif. Pemerintah juga perlu mengalokasikan dana untuk penelitian lebih lanjut dan uji coba lapangan guna mengoptimalkan penerapan teknologi ini dalam kondisi iklim dan geografis Indonesia yang unik.

Universitas dan lembaga penelitian harus berperan aktif dalam mengembangkan dan menguji teknologi baru yang dapat digunakan untuk mengurangi suhu permukaan jalan. Topik penelitian yang perlu dieksplorasi lebih lanjut meliputi pengembangan material baru dengan konduktivitas termal yang lebih rendah, optimasi formulasi pigmen reflektif, serta studi komprehensif tentang efek jangka panjang dari metode ini terhadap infrastruktur jalan. Kolaborasi antara universitas, industri, dan pemerintah akan sangat penting untuk memastikan bahwa penelitian yang dilakukan relevan dan dapat diimplementasikan secara praktis.

Perusahaan konstruksi dan produsen bahan jalan harus mulai mengadopsi teknologi ini dalam operasi mereka. Investasi dalam peralatan dan pelatihan untuk menerapkan coating reflektif dan aspal berwarna terang akan diperlukan. Perusahaan juga harus bekerja sama dengan universitas dan lembaga penelitian untuk menguji dan mengoptimalkan teknologi ini sebelum diterapkan secara luas.

Edukasi dan pelatihan bagi insinyur dan pekerja konstruksi tentang manfaat dan teknik penerapan teknologi pengurangan suhu permukaan aspal sangat penting. Ini dapat dilakukan melalui program pelatihan khusus, seminar, dan lokakarya yang diselenggarakan oleh pemerintah, universitas, atau asosiasi industri.

Dengan langkah-langkah ini, Indonesia dapat memanfaatkan teknologi pengurangan suhu permukaan aspal untuk meningkatkan ketahanan dan umur jalan raya, serta mengurangi dampak negatif dari suhu tinggi pada lingkungan dan masyarakat. Kolaborasi yang kuat antara semua pemangku kepentingan akan memastikan keberhasilan implementasi teknologi ini dan membawa manfaat jangka panjang bagi infrastruktur jalan di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Sam Ratulangi Manado atas dukungannya dalam penelitian ini. Penghargaan khusus ditujukan kepada Fakultas Teknik, Departemen Teknik Sipil, serta seluruh staf dan sumber daya yang telah membantu mewujudkan proyek ini.

REFERENSI

- [1] Rahman, T., Suhendri, S., Tajudin, A. N., Suwanto, F., Sudigdo, P., & Thom, N. "Durability evaluation of heat-reflective coatings for road surfaces: A systematic review," *Sustainable Cities and Society*, vol. 112, 2024, 105625. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105625>.
- [2] Environmental Protection Agency, "Using Cool Pavement to Reduce Urban Heat Islands" 2023.
- [3] Gong, X., Liu, Q., Lv, Y., Chen, S., Wu, S., & Ying, H. "A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, 2023, e01852. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852>.
- [4] Khasawneh, M. A., Sawalha, A. A., Aljarrah, M. T., & Alsheyab, M. A. "Effect of aggregate gradation and asphalt mix volumetrics on the thermal properties of asphalt concrete," *Case Studies in Construction Materials*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01725>.
- [5] Pan, F., Pei, J., Zhang, G., Wen, Y., Zhang, J., & Li, R. "Building the cooling roads with high thermal conductivity pavements to relieve urban heat island effect," *Construction and Building Materials*, vol. 346, 2022, 128276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128276>.

- [6] Kyriakodis, G.-E., & Santamouris, M. "Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project," *Urban Climate*, vol. 24, 2018, pp. 326-339. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>.
- [7] Phoenix Street Transportation Department, "Street Transportation Cool Pavement Pilot Program" 2021.
- [8] Los Angeles Bureau of Street Services, "Cool LA Neighborhoods", 2019.
- [9] Bloomberg Associates, "Mitigating Urban Heat Island Effects: Cool Pavement Interventions". *Research Overview*, 2019.
- [10] D. J. Nowak, D.E. Crane, and J.C. Stevens, "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 4, no. 3-4, pp. 115-123, 2006.
- [11] L. Doulos, M. Santamouris, and I. Livada, "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials," *Solar Energy*, vol. 77, no. 2, pp. 231-249, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>
- [12] C. Pinheiro, S. Landi Jr., O. Lima Jr., L. Ribas, N. Hammes, I. Rocha Segundo, N. Cândido Homem, V. Castelo Branco, E. Freitas, M. F. Costa, and J. Carneiro, "Advancements in Phase Change Materials in Asphalt Pavements for Mitigation of Urban Heat Island Effect: Bibliometric Analysis and Systematic Review," *Sensors*, vol. 23, no. 18, p. 7741, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23187741>
- [13] M. M. Salman and O. A. Abd Alwahab, "Using Phase Change Material to Improve Asphalt Pavement Behavior," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1076, 2nd International Scientific Conference of Engineering Sciences (ISCES 2020), 16th-17th December 2020, Diyala, Iraq, p. 012104, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1076/1/012104>
- [14] S. Li, T. Ma, and D. Wang, "Photovoltaic pavement and solar road: A review and perspectives," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, p. 102933, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102933>
- [15] K.W. Lee, M. L. Greenfield, D. Schumacher, K. Lapierre, and A. DeCotis, "Energy Harvesting and Pavement Sensing for Enhanced Life of Pavement Structures" *Transportation Infrastructure Durability Center*, 2020.
- [16] E. Diz-Mellado, V. P. López-Cabeza, C. Rivera-Gómez, E. Naboni, and C. Galán-Marín, "Optimizing a courtyard microclimate with adaptable shading and evaporative cooling in a hot Mediterranean climate," *Journal of Building Engineering*, vol. 88, p. 109167, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109167>
- [17] K. Anders, T. Weise, N. Aeschbach, and B. Höfle, "Strategies of Managing Urban Tree Vegetation: A Study of Cities in Taiwan," Technical Report, Universität Heidelberg, June 2022. <https://doi.org/10.11588/heidok.00031780>
- [18] M. Shamsaei, A. Carter, and M. Vaillancourt, "A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods," *Construction and Building Materials*, vol. 359, p. 129350, 12 December 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129350>
- [19] S. R. Al Etba, N. A. Hassan, R. P. Jaya, E. Aminudin, M. Z. H. Mahmud, A. Mohamed, and A. A. Hussein, "Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: A state-of-the-art review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, no. 5, May 2021, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.02.001>
- [20] Wang, X., Ma, B., Li, S., Si, W., Wei, K., Zhang, H., Zhou, X., Fang, Y., Kang, X., & Shi, W., "Review on application of phase change materials in asphalt pavement" *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 185-229. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.001>